

甘蓝型油菜耐湿性综合评价体系的构建与应用

杨玉恒 昝晓飞 余青青 代兵兵 周猛林 田露申 邓武明 宋 稀

(南充市农业科学院, 637000, 四川南充)

摘 要 选取耐湿性有明显差异的 21 份甘蓝型油菜品种(系), 在萌发期和苗期分别进行淹水胁迫, 通过测定萌发期生理指标、苗期长势及成熟期产量和品质性状的变化, 构建了甘蓝型油菜耐湿性综合评价体系, 并利用该体系鉴定筛选出 4 个具有较强耐渍性甘蓝型油菜品种(系) (NY18、ZS11、AGREV012、ZS4/W757), 2 个耐渍性较弱的品种(系) [M417 (CV) 和 ZS4///南 A2/B94076//中双 5 号]。本研究为油菜耐渍种质筛选、育种改良和耐渍机理研究提供了参考依据。

关键词 甘蓝型油菜; 品种(系); 耐湿性; 鉴定体系

油菜 (*Brassica napus* L.) 作为中国最大的油料作物, 年种植面积达 8000 hm² 左右^[1], 是我国食用植物油的最大来源, 也是第二大饲料蛋白质来源。长江流域油菜种植面积占全国油菜种植面积的 80%, 该地区气候湿润、水资源丰富, 在农作物生产中具有重要地位^[2-3]。然而, 该区域油菜播种时常面临土壤湿度过高、黏度过大等问题, 导致渍害频发、出苗率降低^[4-5]。品种的耐逆性与油菜品质和产量有直接联系, 同时也是油菜品质改良的基础之一。因此, 提高油菜渍害抗性已成为现阶段油菜育种的主要目标之一。

植物常常通过根系形态变化来应对非生物胁迫, 如形成气生组织和不定根以改善根系内的气体交换或增强吸收能力^[6-7]。由于根系缺乏通气组织, 在各类非生物胁迫中, 淹水胁迫对油菜造成的损害最为严重、产量降幅也最大^[8-9]。淹水通过阻碍根系吸收养分并破坏根细胞, 导致叶片过早老化和光合作用受阻^[10]——这主要是由于叶片气孔关闭和叶绿素降解所致。土壤中 O₂ 扩散缓慢且供应有限, 会促使根系代谢从有氧模式转向无氧模式, 进而引发生长迟缓和产量下降^[11]。此外, 水涝还会影响油料作物的脂质代谢。以花生^[12]和向日葵^[13]为例, 在胁迫条件下, 其饱和脂肪酸含量会减少, 而不饱和脂肪酸含量则相应增加。油菜籽的品质主要取决于油含量和脂肪酸组成(如油酸等), 而水涝胁迫会干扰其脂质代谢, 导致品质下降。研究^[14]表明, 在油菜籽早花期, 水涝会增加油酸和硫苷含量, 同时

降低亚油酸含量。

针对耐渍作物品种培育及耐渍机制解析, 此前已进行了诸多研究。Zou 等^[14]在油菜 4~6 叶期进行田间淹水胁迫处理, 发现油菜耐湿性存在显著的遗传变异, 不同甘蓝型油菜品种的耐湿性在产量上存在差异, 对涝渍非常敏感的品种产量损失达到 50% 以上, 最耐受的品种产量仅下降 10%。Hussain 等^[15]发现, 过量硫可作为调节剂, 一定程度上缓解淹水胁迫对油菜的不利影响并促进幼苗生长。Li 等^[16]发现, *BnaPGIP2* 可通过延缓根细胞壁中果胶的降解, 帮助油菜应对淹水胁迫并增强耐渍性。李浩杰等^[17]采用室内淹水和田间模拟渍害对甘蓝型油菜耐渍性进行鉴定, 发现油菜经胁迫后, 根鲜重、根长和株高等指标下降, 同时株高、有效角果数和单株产量等发生极显著降低, 而可溶性糖、丙二醛 (MDA)、脯氨酸 (Pro) 含量和超氧化物歧化酶 (SOD) 活性都升高。唐章林等^[18]采用盆栽方式在油菜四叶一心时进行渍害胁迫处理, 发现胁迫后幼苗绿叶数、地上部鲜质量等性状显著升高。Hare 等^[19]在塑料桶中对不同叶龄的 6 种热带草渍水胁迫 0、10、20 和 30 d, 发现在淹水胁迫条件下存活并至少保持干重的能力可作为耐湿性鉴定的主要指标。

前人^[20]关于甘蓝型油菜耐湿性的鉴定, 多选取萌发期、苗期或成熟期进行淹水胁迫处理并鉴定, 但涉及多个生育期的综合性鉴定报道较少。萌发期和幼苗期对于作物生长发育而言均十分重要, 萌发

作者简介: 杨玉恒, 主要从事油菜遗传育种与栽培技术研究, E-mail: 89105004@qq.com

宋稀为通信作者, 主要从事油菜遗传育种与栽培技术研究, E-mail: xixi420.haha@163.com

基金项目: 国家现代农业产业技术体系四川油菜创新团队 (SCCXTD-2025-3); 南充市农业科学院青年基金项目

收稿日期: 2025-10-17; 修回日期: 2025-12-14; 网络出版日期: 2026-02-04

率的降低将直接减少出苗基数，而幼苗期耐受性不足则易导致弱苗、死苗，二者严重影响群体建成及后续产量形成。基于此，本研究通过 2 个试验周期的萌发期密闭淹水缺氧处理与苗期大田淹水胁迫处理相结合，并测量淹水胁迫处理后萌发期生理指标、苗期生长状态及后续成熟期农艺性状和品质性状的变化，进而筛选出便捷、易操作的耐湿性鉴定方法，建立较为可靠的油菜耐湿性鉴定评价体系，并据此筛选油菜耐湿种质资源，为遗传改良奠定基础。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试材料为南充市农业科学院油菜研究所种质资源库中经耐湿性预备试验初筛（参试材料 60 份，调查幼苗死亡率、萎焉系数，并在淹水后进行田间观察），选择耐湿性有明显差异且具有不同遗传背景的 21 份甘蓝型油菜品种（系），详见表 1。

表 1 供试材料
Table 1 Test material

编号 Code	品种（系） Variety (line)	编号 Code	品种（系） Variety (line)
1	M417 (CV)	12	ZS9
2	ZS4//南 A2/B94076//中双 5 号	13	ZS6/W757
3	F219	14	T8
4	T8	15	R896-2
5	NY18	16	WY29
6	18C	17	ZS4/W757
7	Z254	18	FC03 (CV)
8	ZS11	19	130532-1
9	AGREV012	20	德油早 1 号
10	D57	21	楚 0708 (CV)
11	AGREV012		

1.2 试验方法

1.2.1 苗期田间淹水处理 试验在南充市农业科学院濞溪科研试验基地（30°52'53" N, 106°2'46" E）完成，田间试验开展 2 个周期。前茬为水稻，土质为黄泥土，地势平坦，排灌方便，肥力中等，地力均匀。试验设 CK 不淹水（T0）、淹水 10 d（T1）、淹水 15 d（T2）和淹水 20 d（T3）4 个处理，采用随机区组设计，2 次重复，重复间设走道（宽 0.6 m）。每份材料种植面积 1.2 m²，2 行区，每行 10 株，直播规格 50 cm×12 cm。选择在幼苗第 6~7 片真叶长出时，进行淹水处理，各淹水处理间相距 1.5 m，

为防止不同淹水处理之间相互窜水，不同淹水处理间垒土坝加固，在各处理厢面四周开深沟，铺埋塑料膜设置隔水层。用加厚塑料膜覆盖土坝两侧并密封固定，与周围隔离，不同处理间开 0.6 m 深沟铺埋塑料薄膜隔水。淹水期间保持水层在厢面 3 cm 左右，淹水结束后迅速去水解除胁迫。

1.2.2 苗期生长性状 在达到预定淹水处理天数后，排干水正常生长 7 d，各处理选取每小区第 2 行连续 5 株，分别统计和测量茎上所有的绿叶数和苗高，按照农业气象相关规范，能进行光合作用的叶片均为绿叶，没展开的新叶也一并计入，部分黄化的叶片则按绿色部分占整个叶片的百分比进行计算，如绿色部分面积占整个叶片面积的 30%，其余部分已变黄，则将其记为 0.3 片绿叶，此为目测估算值，结果保留 1 位小数；苗高为从子叶节到顶端分生组织（生长点）的长度。

1.2.3 成熟期农艺性状 成熟期每份材料随机取 5 株测量考种，3 次重复，涉及株高、一次有效分枝高度、一次有效分枝数、主花序长度、主花序有效角果数、主花絮无效角果数、一分枝有效角果数、单株有效角果数、每果粒数、千粒重和经济产量等。株高指从子叶节到整株油菜主茎最高点的长度；一次有效分枝高度是指子叶节与主茎上最下部第一个有效分枝着生点之间的距离；一次有效分枝数指直接从主茎上长出的有一个有效角果以上的分枝数目；经济产量是指 5 株植株所有自然风干种子总重量的平均值。

1.2.4 品质性状 每份材料随机取 5 株单独脱粒并进行 3 次重复，采用近红外光谱法测定油菜籽芥酸、硫苷、含油量、蛋白质、亚麻酸、亚油酸和花生烯酸含量。

1.2.5 萌发期生理指标 通过 2 个周期大田淹水试验，从 21 份材料中鉴别出耐湿性强弱差异显著的 12 份材料进行试验，参考并适当改进 Langan 等^[20]的方法，选取饱满种子置于滤纸发芽床中，于 25 °C 萌发 60 h，取露白后 48 h 的芽苗（胚根长 2~3 mm）50 粒转移到 50 mL 带盖 PVC 离心管中，无菌淹水缺氧处理 24 h（24H），用无菌水冲洗 3~4 次后，置于 1 cm 左右厚湿润细砂（细砂预先于 105 °C 的烘箱处理 24 h）发芽床中，再覆盖一层细砂，保持湿润，于 25 °C 继续发芽 6 d，以不经水淹处理的芽苗为对照（CK），CK 的露白种子不作水淹处理直

接进行沙培。6 d 后, 24H 和 CK 处理每份材料随机选取 4~5 株苗准确称量 0.25 g, 混合磨样, 采用南京建成生物工程研究所研发的蛋白定量 (TP) 测定试剂盒 (A045-2 考马斯亮蓝法)、MDA 测定试剂盒 (A003-1 TBA 法)、过氧化物酶 (POD) 测定试剂盒 (A084-3-1 比色法)、Pro 测定试剂盒 (A107-1-1 比色法)、植物铜锌-超氧化物歧化酶 (Cu²⁺-Zn²⁺-SOD) 测定试剂盒 (A001-4-1 比色法) 分别测定可溶性蛋白 (soluble protein, SP)、MDA、Pro 含量及 POD、植物铜锌-超氧化物歧化酶 (Copper-zinc superoxide dismutase, Cu-Zn SOD) 和 SOD 活性。

1.3 数据处理

采用 SPSS 27.0 进行描述性统计、方差分析和聚类分析, 采用 DPSV16.05^[21] 进行主成分分析。根据先前已有研究^[22-23], 对 WTC、隶属函数值 (membership function value, MFV) 等相关数据进行计算。

2 结果与分析

2.1 苗期淹水处理前绿叶数与苗高

由表 2 可知, 淹水处理、淹水处理与材料互动间的绿叶数、苗高差异不显著, 表明淹水处理前各处理间苗情一致, 绿叶数和苗高 2 个性状在不同材料间均存在极显著差异, 表明供试材料本身存在遗传差异, 符合试验设计要求, 可进行下一步淹水处理试验。

表 4 淹水处理绿叶数、苗高与 CK 差值均值成对比较

Table 4 Comparison of mean differences in number of green leaves and seedling height between flooding treatment and CK

处理 Treatment	绿叶数 Number of green leaves			苗高 Seedling height		
	(对照-处理) 均值 (Control-treatment) mean	处理 Treatment	均值差 Mean difference	(对照-处理) 均值 (Control-treatment) mean	处理 Treatment	均值差 Mean difference
T3	0.919	T3-T2	0.516*	1.739	T3-T2	1.748**
T2	0.406	T3-T1	0.910**	-0.009	T3-T1	2.510**
T1	0.010	T2-T1	0.397*	-0.771	T2-T1	0.761

“*”表示差异达 $P < 0.05$ 显著水平, 下同。

“**” indicates significant difference at $P < 0.05$ level, the same below.

差异, 其中 T3 与 T1 处理绿叶数的变化差异极显著; T3 与 T1 处理苗高的变化差异极显著, T3 与 T2 处理苗高的变化差异极显著, T2 与 T1 处理苗高的变化差异不显著。

2.3 淹水处理后农艺性状及产量性状

对 21 份材料成熟期农艺性状及产量性状进行

表 2 21 份油菜品种 (系) 淹水前绿叶数、苗高的方差分析

Table 2 Variance analysis of number of green leaves and seedling height of 21 rapeseed varieties (lines) before flooding

变异来源 Source of variation	自由度 df	F 值 F-value	
		绿叶数 Number of green leaves	苗高 Seedling height
淹水处理 Flooding treatment	3	2.302	1.853
材料 Material	20	2.411**	3.894**
淹水处理×材料 Flooding treatment×material	60	0.310	0.522
误差 Error	84		

“***”表示差异达 $P < 0.01$ 显著水平, 下同。

“***” indicates significant difference at $P < 0.01$ level, the same below.

2.2 苗期淹水处理后绿叶数与苗高

由表 3 和表 4 可知, 淹水处理后绿叶数和苗高在淹水处理和材料间的差异均极显著, 在淹水处理与材料互动间的差异不显著。绿叶数的变化在 T1、T2、T3 处理组与对照 (CK) 绿叶数差值呈现明显

表 3 21 份油菜品种 (系) 淹水后绿叶数、苗高的方差分析

Table 3 Variance analysis of number of green leaves and seedling height of 21 rapeseed varieties (lines) after flooding

变异来源 Source of variation	自由度 df	F 值 F-value	
		绿叶数 Number of green leaves	苗高 Seedling height
淹水处理 Flooding treatment	2	9.974**	12.939**
材料 Material	20	2.299**	2.731**
淹水处理×材料 Flooding treatment×material	40	0.542	0.414
误差 Error	63		

了测定。由表 5 和表 6 可知, 与 CK 处理相比, 农艺性状受淹水胁迫后均呈下降趋势, 其中在单株角果数和主花序有效角果数方面, 处理组均低于 CK。株高和一次有效分枝高度也有类似的表现。此外, 在一分枝有效角果数方面, T1 处理与 CK 相比下降趋势最大, 同时经济产量和千粒重也明显下降。

表 5 21 份油菜品种 (系) 2 个试验周期成熟期农艺性状
Table 5 Agronomic traits at the maturity stage of 21 varieties (lines) in two test cycles

处理 Treatment	试验周期 Test cycle	株高 Plant height (cm)	一次有效分枝高度 Primary effective branch height (cm)	主花序长度 Main inflorescence length (cm)	一次有效分枝数 Number of primary effective branches	主花序无效角果数 Invalid pods in main inflorescence
T0 (CK)	1	73.503±20.542	51.658±12.004	20.636±9.730	0.379±0.823	3.800±3.536
	2	152.784±25.845	54.730±19.472	57.681±8.932	6.410±1.140	7.863±5.684
T1	1	80.952±14.288	54.098±10.769	24.771±7.655	0.467±0.795	3.993±2.576
	2	142.906±27.475	49.815±19.225	55.291±9.951	5.972±1.523	6.061±5.688
T2	1	70.279±17.362	50.153±12.198	19.729±7.158	0.139±0.228	4.023±2.728
	2	138.369±26.673	43.163±16.680	56.008±10.628	6.060±1.313	6.357±5.190
T3	1	67.752±20.096	46.324±11.371	21.404±11.801	0.251±0.552	4.436±3.631
	2	128.920±22.014	36.526±15.216	53.220±10.775	5.954±1.676	6.832±4.467

处理 Treatment	试验周期 Test cycle	主花序有效角果数 Effective pods in main inflorescence	一分枝有效角果数 Number of pods per primary branch	每果粒数 Number of seeds per pod	单株角果数 Number of pods per plant
T0 (CK)	1	19.314±9.457	2.478±6.932	13.816±4.069	21.019±14.361
	2	68.932±19.045	257.756±105.979	13.727±5.971	326.687±14.361
T1	1	23.152±6.392	3.117±6.617	16.313±2.556	26.195±11.141
	2	64.548±16.998	202.609±85.321	13.924±5.413	299.119±113.963
T2	1	19.685±7.730	0.563±1.244	13.973±3.750	20.248±8.425
	2	58.516±15.245	248.655±119.895	11.919±5.370	307.171±129.735
T3	1	18.704±8.881	2.110±5.323	14.402±3.403	20.263±12.378
	2	51.271±19.225	247.254±168.329	12.822±7.727	20.281±12.439

表 6 21 份油菜品种 (系) 经济产量及千粒重
Table 6 Economic yield and 1000-grain weight
of 21 varieties (lines) of rapeseed

处理 Treatment	经济产量 (g/株) Economic yield (g/plant)	千粒重 1000-grain weight (g)
T0 (CK)	149.885±68.782	3.491±0.569
T1	143.129±61.904	3.569±0.561
T2	114.744±51.910	3.293±0.520
T3	107.316±47.155	3.376±0.606

2.4 淹水处理后品质性状

由表 7 和表 8 可知, 21 份甘蓝型油菜品种 (系) 的品质性状表现不同, 含油量和蛋白质含量在淹水处理、材料和淹水处理与材料互作方面都呈现极显著差异; 亚油酸、花生烯酸和亚麻酸 3 个性状在淹水处理和材料间呈现极显著差异; 芥酸在淹水处理间呈显著差异, 在材料间呈极显著差异; 硫

表 7 21 份油菜品种 (系) 的品质性状
Table 7 Quality traits of 21 rapeseed varieties (lines)

处理 Treatment	试验周期 Test cycle	芥酸 Erucic acid	硫苷 Sulfur glycoside	含油量 Oil content	蛋白质含量 Protein content	亚麻酸 Linolenic acid	亚油酸 Linoleic acid	花生烯酸 Arachidonic acid
T0	1	0.294±0.580	36.554±12.045	43.779±3.373	17.753±2.531	8.810±2.107	18.035±1.908	3.676±2.135
	2	0.738±0.423	29.032±6.202	42.896±3.977	24.193±2.175	10.022±1.194	16.843±1.948	0.566±1.125
T1	1	0.310±0.529	31.125±11.523	42.414±3.458	18.939±2.201	10.258±1.501	18.896±1.969	2.301±1.185
	2	0.548±0.380	28.026±6.528	43.560±2.987	23.138±2.041	9.874±0.941	15.957±1.784	0.100±1.234
T2	1	0.232±0.455	33.913±11.791	43.675±3.299	18.257±2.097	9.391±1.987	18.446±1.871	2.894±1.617
	2	0.694±0.378	29.883±7.206	42.326±3.047	23.707±2.259	9.844±1.035	16.794±1.822	0.141±1.092
T3	1	0.243±0.529	35.553±12.446	43.554±2.968	18.179±1.834	8.535±2.173	18.290±1.699	3.196±1.642
	2	0.620±0.360	27.915±5.861	41.799±4.592	23.999±2.236	9.906±1.299	16.793±2.123	0.041±1.145

苷在淹水处理间差异显著, 在材料间差异极显著。

2.5 萌发期淹水处理后生理指标测定

萌发初期的种子经过 24 h 淹水处理后, 在正常条件下培养 6 d 对相关指标进行测定。如表 9 所示, 与 CK 相比, 处理后 SPC、MDA、Pro、POD

和总 SOD (T-SOD) 活性均有不同程度升高, 尤其是 MDA 含量升高明显。

2.6 主成分分析

采用从农艺性状、产量性状和品质性状等中选取在淹水处理间和材料间都存在极显著差异的

表 8 2 个试验周期 21 份油菜品种 (系) 品质性状的方差分析
Table 8 Variance analysis of quality traits of 21 rapeseed varieties (lines) in two experimental cycles

变异来源 Source of variation	自由度 df	试验 周期 Test cycle	F 值 F-value						
			芥酸 Erucic acid	硫苷 Sulfur glycoside	含油量 Oil content	蛋白质含量 Protein content	亚麻酸 Linolenic acid	亚油酸 Linoleic acid	花生烯酸 Arachidonic acid
淹水处理 Flooding treatment	3	1	0.754	2.257	7.997**	8.248**	8.489**	5.565**	8.386**
		2	3.763*	2.936*	4.161**	4.491**	0.280	8.748**	4.427**
材料 Material	20	1	1.914**	4.381**	33.253**	22.688**	4.118**	21.264**	6.290**
		2	7.665**	14.733**	11.813**	14.011**	15.581**	33.059**	17.935**
淹水处理×材料 Flooding treatment×material	60	1	0.890	0.871	1.415	1.620*	0.883	1.127	1.143
		2	2.392**	1.971**	2.319**	2.390**	2.019**	3.640**	1.470
误差 Error	84								

表 9 12 份油菜品种 (系) 萌发期淹水胁迫下生理指标测定
Table 9 Determination of physiological indicators of 12 varieties (lines) under waterlogging stress at germination stage

处理 Treatment	可溶性蛋白 SP (μg/g)	丙二醛 MDA (nmol/mg prot)	脯氨酸 Pro (U/g)	过氧化物酶 POD (U/g)	铜锌超氧化物歧化酶 Cu-Zn SOD (U/g)	超氧化物歧化酶 T-SOD (U/g)
CK	1.732±0.439	0.132±0.055	1.062±0.718	575.103±136.912	645.564±80.982	843.571±91.819
24H	1.836±0.541	0.340±0.100	1.267±0.819	609.713±167.402	647.650±59.027	866.106±82.568

11 个性状的耐湿系数进行主成分分析, 各主成分 1 个因子累计贡献率为 94.57%, 可代表所有性状的全部信息。因子特征值、贡献率和累计贡献率见表 10。前 7

表 10 主成分因子特征值、贡献率及累计贡献率
Table 10 Principal component factor eigenvalues, contribution rates, and cumulative contribution rates

主成分因子 Principal component factor	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate (%)	累计贡献率 Cumulative contribution rate (%)	主成分因子 Principal component factor	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate (%)	累计贡献率 Cumulative contribution rate (%)
PC1	3.90	35.42	35.42	PC7	0.46	4.21	94.57
PC2	2.05	18.67	54.09	PC8	0.28	2.56	97.12
PC3	1.64	14.88	68.98	PC9	0.17	1.51	98.63
PC4	1.11	10.06	79.04	PC10	0.10	0.94	99.57
PC5	0.65	5.95	84.99	PC11	0.05	0.43	100.00
PC6	0.59	5.37	90.36				

由表 11 可知, PC1 中经济产量、绿叶数、含 高、绿叶数和蛋白质含量占比较大; PC3 中一次有效分枝数及亚油酸、含油量、千粒重和蛋白质含

表 11 主成分因子特征向量值
Table 11 Principal component factor eigenvector values

性状 Trait	主成分因子 Principal component factor						
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
绿叶数 Number of green leaves	0.3929	0.2128	-0.0759	-0.1498	0.0844	0.4908	-0.1435
苗高 Seedling height	0.2332	0.4287	-0.2843	0.0364	0.0457	0.2717	0.6460
株高 Plant height	0.3737	0.2555	0.0860	0.2959	0.2839	-0.3418	-0.1828
一次有效分枝数 Number of primary effective branches	0.1794	0.2095	0.5243	0.3526	-0.5204	0.0418	-0.1179
每果粒数 Number of seeds per pod	0.2907	-0.4206	-0.2628	0.2647	0.0237	0.0953	-0.2795
含油量 Oil content	0.3874	0.0649	0.3521	-0.0780	-0.0237	-0.3491	0.2855
蛋白质含量 Protein content	-0.3353	0.2889	0.3061	0.1071	0.0176	0.5179	-0.2268
亚油酸 Linoleic acid	-0.0636	-0.3242	0.4603	0.2619	0.6509	0.2025	0.2899
花生烯酸 Arachidonic acid	0.1817	-0.5294	0.1504	-0.1017	-0.4251	0.2594	0.3360
经济产量 Economic yield	0.4578	-0.1079	-0.0810	0.0537	0.0995	0.2434	-0.2684
千粒重 1000-grain weight	0.1604	0.0141	0.3215	-0.7713	0.1537	-0.0031	-0.1864

量占比较大；PC4 中一次有效分枝数、株高、亚油酸含量和每果粒数占比较大；PC5 中亚油酸含量和株高占比较大；PC6 中，蛋白质含量、绿叶数、苗高、花生烯酸含量、经济产量和亚油酸占比较大；PC7 中苗高、花生烯酸、亚油酸和含油量占比较大。

2.7 隶属函数分析

计算 11 个性状隶属函数值，如表 12 所示，平均隶属值排名前 7 位的材料有 8、11、15、14、17、5 和 19。农艺性状的平均隶属函数值排名前 7 位的

材料有 15、14、8、17、11、5 和 10；品质性状的平均隶属函数值排名前 7 位的材料有 11、18、2、17、6、5 和 8；产量性状的平均隶属函数值排名前 7 位的材料有 19、8、15、11、14、5 和 4。其中材料 8、11、17 和 5 的隶属函数值在农艺性状、品质性状、产量性状中均居于前列，表明其具有较为稳定的耐湿能力，材料 2、3、1 和 20 的隶属函数值在农艺性状、品质性状、产量性状中均居于后列，表明耐湿能力较弱。通过计算各材料的主成分因子综合得分，17、11、14、15、8、5 和 18 位

表 12 各性状隶属函数值、主成分因子综合值
Table 12 Trait membership function values and principal component factor composite value

编号 Code	隶属函数分析 MF analysis						主成分分析 PCA			
	平均隶属值 Average membership value	排名 Ranking	农艺性状平均隶属函数值 Agronomic trait average membership value	排名 Ranking	品质性状平均隶属函数值 Quality trait average membership value	排名 Ranking	产量性状平均隶属函数值 Yield trait average membership value	排名 Ranking	主成分因子综合值 Comprehensive value of PCA	排名 Ranking
8	0.701	1	0.804	3	0.550	7	0.743	2	2.825	5
11	0.650	2	0.579	5	0.779	1	0.569	4	5.228	2
15	0.648	3	0.867	1	0.403	18	0.593	3	4.338	4
14	0.637	4	0.830	2	0.469	16	0.492	5	4.991	3
17	0.596	5	0.649	4	0.629	4	0.399	9	6.882	1
5	0.517	6	0.503	6	0.575	6	0.435	6	2.285	6
19	0.476	7	0.312	17	0.538	8	0.763	1	-2.560	18
18	0.463	8	0.353	15	0.743	2	0.179	19	1.891	7
7	0.463	9	0.445	9	0.513	11	0.409	8	-0.519	9
10	0.454	10	0.462	7	0.526	9	0.290	13	-0.647	11
4	0.438	11	0.391	13	0.511	12	0.409	7	0.551	8
12	0.429	12	0.423	10	0.524	10	0.252	17	-2.112	15
21	0.418	13	0.410	11	0.496	13	0.284	15	-2.177	16
6	0.412	14	0.306	18	0.590	5	0.323	12	-1.149	12
16	0.405	15	0.447	8	0.414	17	0.284	14	-1.387	14
2	0.402	16	0.269	20	0.655	3	0.227	18	-2.476	17
3	0.392	17	0.407	12	0.493	14	0.153	20	-0.631	10
13	0.352	18	0.238	21	0.477	15	0.386	10	-5.498	21
9	0.318	19	0.377	14	0.242	20	0.323	11	-4.458	20
1	0.300	20	0.287	19	0.335	19	0.265	16	-4.227	19
20	0.249	21	0.315	16	0.230	21	0.119	21	-1.150	13

列前 7。

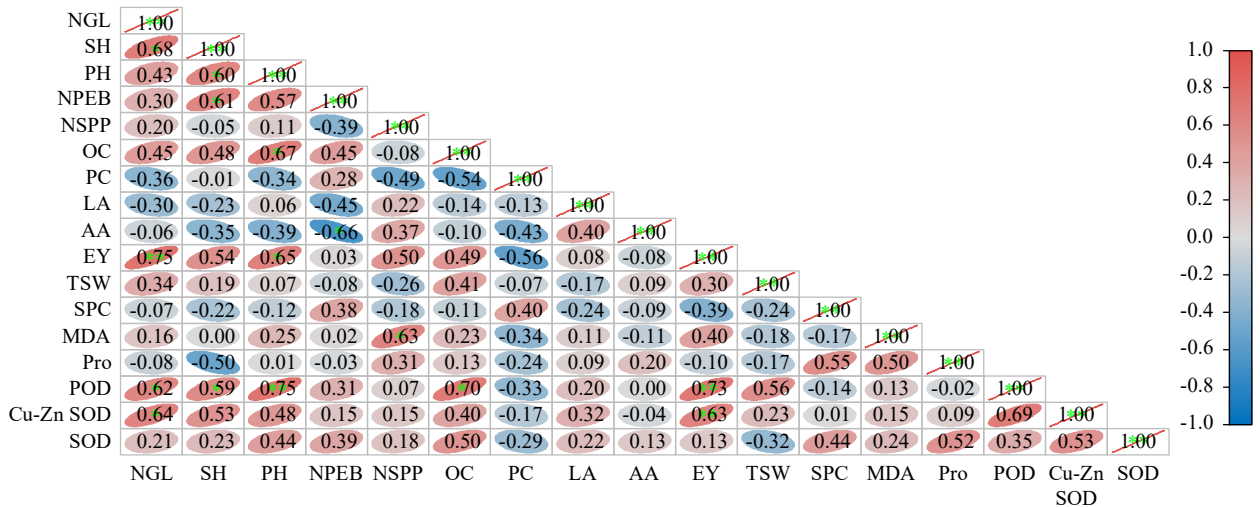
2.8 相关性分析

通过对萌发期生理指标、苗期生长指标、成熟期产量及品质相关性状的耐湿系数进行相关分析，结果如图 1 所示，POD 活性与经济产量呈正相关，相关系数为 0.72；Cu-Zn SOD 与经济产量呈正相关，相关系数为 0.63。结果表明，通过测定甘蓝型油菜发芽期缺氧淹水处理 POD 和 Cu-Zn SOD 值，可以对各材料的耐湿性进行快速

鉴定。

3 讨论

作物耐渍性筛选是鉴定耐渍种质资源的重要手段，通常涉及生理指标、生长发育等多个方面的指标。种子萌发及幼苗期是植物生长发育的初级阶段，也是对渍害最为敏感的时期，该阶段的耐渍性在植株后期生长过程中扮演了十分重要的角色。



PC: 蛋白质含量; LA: 亚油酸; AA: 花生烯酸; NSPP: 每果粒数; EY: 经济产量; TSW: 千粒重; NGL: 绿叶数; SH: 苗高; PH: 株高; OC: 含油量; NEB: 一次有效分枝数; SPC: 可溶性蛋白含量。

PC: protein content; LA: linoleic acid; AA: arachidonic acid; NSPP: number of seeds per pod; EY: economic yield; TSW: 1000-grain weight; NGL: number of green leaves; SH: seedling height; PH: plant height; OC: oil content; NPEB: number of primary effective branches; SPC: soluble protein content.

图 1 各性状间 WTC 相关性分析

Fig.1 Correlation analysis of WTC for traits

3.1 淹水胁迫对表型性状的影响

淹水胁迫对油菜种子产生多方面影响,最显著且直接的表现是表型变化,这种影响几乎贯穿整个生长周期^[24]。不同生长阶段的受胁迫程度存在差异,其中以幼苗期最为显著。作为光合作用的主要场所,叶片是植物生长发育的重要能量来源,渍害影响下其碳水化合物代谢和脂质糖化能力受到抑制^[25]、绿叶数受到严重影响,这表明淹水胁迫能够严重损害油菜的光合作用并进一步导致发育进程延缓^[26-28],类似现象在棉花^[29]、黄瓜^[30]、小麦^[31]和芝麻^[32]中均有报道。本研究中,与 CK 相比, T1~T3 处理的苗高和绿叶数均明显降低,处理时间越长,抑制作用越明显,与同期对照组的差异也越大。综上所述,通过设置 20 d 处理期的田间试验,测量幼苗期的绿叶数和苗高、成熟期的株高和每果粒数等指标,可有效评估油菜品种的耐渍能力。

3.2 淹水胁迫对产量性状的影响

油菜产量与多个性状密切相关,包括每果粒数、一次有效分枝数、主枝角果数以及千粒重等^[33],本研究对上述性状均进行了测量,发现几乎所有指标均呈现下降趋势,表明淹水胁迫对产量产生了明显影响,后续对经济产量的测量也证实了这一结论。这些结果与前人^[34-35]研究的结论一致,均表明了淹水胁迫下产量与这些性状存在相关性。除产量外,种子质量也是成熟阶段的评估指标之一,包括

含油量、脂肪酸组成等。开花期短期淹水胁迫对含油量影响甚微,但若持续时间过长,将严重影响含油量并增加种子中芥酸和硫苷的含量。本研究中上述物质含量的变化趋势与前人研究一致。淹水胁迫可能通过干扰油菜的营养生长来阻碍光合作用和生殖生长进程,最终导致种子发育异常,从而影响油料品质。

3.3 淹水胁迫对萌发期生理特性的影响

呼吸模式的变化可能对生物体的生长发育产生显著影响。在淹水胁迫下的低氧环境中,由于根系进入厌氧模式,加速乙醇积累并形成胞质酸性环境,最终引发氧化爆发并导致萌发率降低、个体生长迟缓。作为氧化爆发的主要产物,活性氧(ROS)的过量生成打破了其积累与清除的平衡,导致生物分子氧化损伤,进而引发细胞损伤和死亡^[36-37]。脂质过氧化不仅会破坏 DNA 和蛋白质功能,还会生成 MDA 等异常醛类物质^[38],这些物质可作为 ROS 引发的细胞膜损伤程度指标^[39-40]。为应对这种情况,抗氧化酶活性和 Pro 等渗透调节物质会被激活,以维持细胞膨压并减少损伤。本研究通过分析抗氧化酶活性、Pro 及 MDA 含量等指标发现,淹水胁迫显著提升了抗氧化酶活性和脂质过氧化产物含量,且不同品种间存在差异。其中, Cu-Zn SOD 在组内和组间均表现出极显著差异,这与前人研究结果一致。综上所述,抗氧化酶系统的增强有

助于维持细胞氧化平衡, 提升对淹水胁迫压力的耐受性。因此, Cu-Zn SOD 和 POD 可作为抗逆性的重要指标。

4 结论

本研究发现通过测量甘蓝型油菜萌发期的 Cu-Zn SOD 和 POD 活性、幼苗期处理 20 d 后的绿叶数和苗高、成熟期的株高和每果粒数等指标, 可有效评估油菜品种的耐渍能力; 并利用构建的甘蓝型油菜耐湿性综合评价体系, 从 21 份参试材料中筛选出 4 个具有较强耐渍性的甘蓝型油菜品种(系) NY18、ZS11、AGREV012 和 ZS4/W757, 以及 2 个耐渍性较弱的品种(系) M417 (CV) 和 ZS4///南 A2/B94076//中双 5 号。

参考文献

- [1] Abdallah M, Dubouset L, Meuriot F, et al. Effect of mineral sulphur availability on nitrogen and sulphur uptake and remobilization during the vegetative growth of *Brassica napus* L. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(10): 2635-2646.
- [2] Fan C M, Tian J H, Hu Z M, et al. Advances of oilseed rape breeding. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2018, 19(3): 447-454.
- [3] Li X H, Li Q B, Yang T W, et al. Responses of plant development, biomass and seed production of direct sown oilseed rape (*Brassica napus*) to nitrogen application at different stages in Yangtze River Basin. *Field Crops Research*, 2016, 194: 12-20.
- [4] Xu M Y, Ma H Q, Zeng L Z, et al. The effect of waterlogging on yield and seed quality at the early flowering stage in *Brassica napus* L. *Field Crops Research*, 2015, 180: 238-245.
- [5] Guo R F, Zhu Y Q, Liu Y B. A comparison study of precipitation in the poyang and the dongting lake basins from 1960-2015. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 3381.
- [6] Men S N, Chen H L, Chen S H, et al. Effects of supplemental nitrogen application on physiological characteristics, dry matter and nitrogen accumulation of winter rapeseed (*Brassica napus* L.) under waterlogging stress. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 10201.
- [7] Yan L Y, Kang Y P, Lei Y, et al. First report of *Sclerotinia sclerotiorum* causing sclerotinia blight on peanut (*Arachis hypogaea*) in Northeastern China. *Plant Disease*, 2013, 98(1): 156-157.
- [8] Akhtar N, Ilyas N, Mashwani Z U R, et al. Synergistic effects of plant growth promoting rhizobacteria and silicon dioxide nano-particles for amelioration of drought stress in wheat. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 166: 160-176.
- [9] Ploschuk R A, Miralles D J, Colmer T D, et al. Waterlogging of winter crops at early and late stages: impacts on leaf physiology, growth and yield. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1863.
- [10] Yan K, Zhao S J, Cui M X, et al. Vulnerability of photosynthesis and photosystem I in Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) exposed to waterlogging. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 125: 239-246.
- [11] Manghwar H, Hussain A, Alam I, et al. Waterlogging stress in plants: unraveling the mechanisms and impacts on growth, development, and productivity. *Environmental and Experimental Botany*, 2024, 224: 105824.
- [12] Zeng R E, Chen T T, Zhang H, et al. Effect of waterlogging stress on grain nutritional quality and pod yield of peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2023, 209(2): 286-299.
- [13] Yasumoto S, Terakado Y, Matsuzaki M, et al. Effects of high water table and short-term flooding on growth, yield, and seed quality of sunflower. *Plant Production Science*, 2011, 14(3): 233-248.
- [14] Zou X L, Hu C W, Zeng L, et al. A comparison of screening methods to identify waterlogging tolerance in the field in *Brassica napus* L. during plant ontogeny. *PLoS One*, 2014, 9(3): e89731.
- [15] Hussain M A, Naeem A, Pitann B, et al. High sulfur (S) supplementation imparts waterlogging tolerance to oilseed rape (*Brassica napus* L.) through upregulating S metabolism and antioxidant pathways. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2023, 42(12): 7591-7605.
- [16] Li J J, Zhang Y T, Chen Y H, et al. The roles of cell wall polysaccharides in response to waterlogging stress in *Brassica napus* L. root. *BMC Biology*, 2024, 22(1): 191.
- [17] 李浩杰, 柴靛, 蒲晓斌, 等. 室内水淹和田间模拟湿害对甘蓝型油菜耐湿性鉴定. *西南农业学报*, 2016, 29(6): 1250-1256.
- [18] 唐章林, 王霖, 张娅茹, 等. 甘蓝型油菜种质资源苗期耐湿性综合评价与筛选. *西南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(12): 19-28.
- [19] Hare M, Saengkham M, Tatsapong P, et al. Waterlogging tolerance of some tropical pasture grasses. *Tropical Grasslands*, 2004, 38(4): 227-233.
- [20] Langan P, Cavel E, Henchy J, et al. Evaluating waterlogging stress response and recovery in barley (*Hordeum vulgare* L.): an image-based phenotyping approach. *Plant Methods*, 2024, 20(1): 146.
- [21] Tang Q Y, Zhang C X. Data Processing system (DPS) software with experimental design, statistical analysis and data mining developed for use in entomological research. *Insect Science*, 2013, 20(2): 254-260.
- [22] Chang T, Wu J J, Wu X P, et al. Comprehensive evaluation of high-oleic rapeseed (*Brassica napus*) based on quality, resistance, and yield traits: a new method for rapid identification of high-oleic acid rapeseed germplasm. *PLoS One*, 2022, 17(8): e0272798.
- [23] Kojf F S, Saba J. Using cluster analysis and principal component analysis to group lines and determine important traits in white bean. *Procedia Environmental Sciences*, 2015, 29: 38-40.
- [24] Zhou X Y, Xu J S, Xie L L, et al. Physiological mechanisms in response to waterlogging during seedling stage of *Brassica napus* L. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(4): 1015-1029.
- [25] Yang H J, Bai C Y, Ai X Y, et al. Conversion of lipids into carbohydrates rescues energy insufficiency in rapeseed germination under waterlogging stress. *Physiologia Plantarum*, 2024, 176(5): e14576.
- [26] Zhang X K. Physiological reaction differences of rapeseed (*Brassica napus* L.) with different waterlogging-tolerance to anoxia. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(3): 485-491.
- [27] Hong B, Zhou B Q, Peng Z C, et al. Tissue-specific transcriptome

- and metabolome analysis reveals the response mechanism of *Brassica napus* to waterlogging stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(7): 6015.
- [28] 吴鹏博, 李立军, 张艳丽. 油菜苗期耐盐碱性综合评价与根际土壤有机酸含量比较. *作物杂志*, 2022(1): 110-115.
- [29] Zhang Y J, Liu G Y, Dong H Z, et al. Waterlogging stress in cotton: damage, adaptability, alleviation strategies, and mechanisms. *The Crop Journal*, 2021, 9(2): 257-270.
- [30] Barickman T C, Simpson C R, Sams C E. Waterlogging causes early modification in the physiological performance, carotenoids, chlorophylls, proline, and soluble sugars of cucumber plants. *Plants*, 2019, 8(6): 160.
- [31] Malik A I, Colmer T D, Lambers H, et al. Short-term waterlogging has long-term effects on the growth and physiology of wheat. *New Phytologist*, 2002, 153(2): 225-236.
- [32] Wei W L, Li D H, Wang L H, et al. Morpho-anatomical and physiological responses to waterlogging of sesame (*Sesamum indicum* L.). *Plant Science*, 2013, 208: 102-111.
- [33] Zhou W J, Lin X Q. Effects of waterlogging at different growth stages on physiological characteristics and seed yield of winter rape (*Brassica napus* L.). *Field Crops Research*, 1995, 44(2): 103-110.
- [34] Wollmer A C, Pitann B, Mühling K H. Waterlogging events during stem elongation or flowering affect yield of oilseed rape (*Brassica napus* L.) but not seed quality. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2018, 204(2): 165-174.
- [35] Yang X Y, Xiao R H, Zhang L X, et al. Effects of waterlogging at different growth stages on the stress-resistance physiological characteristics and yield formation of sweet potato. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, 51(3): 744-754.
- [36] Hasanuzzaman M, Bhuyan M H M B, Zulfiqar F, et al. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, 2020, 9(8): 681.
- [37] Qiu T C, Li Y X, Bai Q Y, et al. The OsFBX388-OsFIP1-OsCatA module regulates ROS homeostasis and disease resistance in rice. *New Phytologist*, 2025, 247(6): 2871-2884.
- [38] Demidchik V. Mechanisms of oxidative stress in plants: from classical chemistry to cell biology. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 109: 212-228.
- [39] 邓超众, 胡佩敏, 熊勤学, 等. 基于小麦渍害过程探讨胁迫量化方案的综述. *作物杂志*, 2025(6): 1-10.
- [40] 杨丹丹, 韩雪, 孔欣欣, 等. 71 份冬小麦苗期渗透胁迫抗性鉴定及相关农艺性状指标分析. *作物杂志*, 2025(1): 243-249.

Construction and Application of a Comprehensive Evaluation System for Waterlogging Tolerance of *Brassica napus* L.

Yang Yuheng, Zan Xiaofei, Yu Qingqing, Dai Bingbing,
Zhou Menglin, Tian Lushen, Deng Wuming, Song Xi

(Nanchong Academy of Agricultural Sciences, Nanchong 637000, Sichuan, China)

Abstract A total of 21 *Brassica napus* L. varieties (lines) with obvious differences in waterlogging tolerance were selected and subjected to waterlogging stress at the germination and seedling stages, respectively. By determining physiological indices at the germination stage, seedling growth vigor, as well as yield and quality traits at the maturity stage, a comprehensive evaluation system for waterlogging tolerance of *B. napus* L. was established. Using this evaluation system, four varieties (lines) with strong waterlogging tolerance (NY18, ZS11, AGREV012, ZS4/W757) and two varieties (lines) with weak waterlogging tolerance (M417 (CV), ZS4///Nan A2/B94076//Zhongshuang No.5) were identified. This study provides a reference for waterlogging-tolerant germplasm screening, rape seed breeding improvement and research on waterlogging tolerance mechanistic.

Key words *Brassica napus* L.; Variety (line); Waterlogging tolerance; Identification system